

УДК 004.94

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРИМЕРНЫХ СТРУКТУР СВЧ-РАЗРЯДА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН**Есаков Игорь Иванович,***д-р техн. наук, профессор,**руководитель лаборатории ударно-волновых технологий,**e-mail: iesakov@yandex.ru,**Московский университет имени С.Ю. Витте,***Бычков Владимир Львович,***д-р физ.-мат. наук,**ведущий научный сотрудник физического факультета,**e-mail: bychvl@gmail.com,**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,***Арделян Николай Васильевич,***д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник факультета**вычислительной математики и кибернетики,**e-mail: ardelnik@gmail.com,**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

Представленное исследование посвящено компьютерному моделированию взаимодействия между ударными волнами (УВ) и стримерами высокочастотного разряда (СВЧ) в связи с проблемой звукового удара. В настоящее время существует ряд работ, касающихся использования плазмы для ослабления звукового удара. Авторами статьи рассмотрено создание горячих нитей (филаментов) разными источниками плазмы. В подходах, связанных с применением СВЧ-разряда, предполагается распространение УВ через горячие нити, вызывающей их взрыв и влияющих на саму УВ.

Настоящая работа посвящена исследованию распространения УВ через нити СВЧ-разряда с целью определения параметров нитей-филаментов, при которых может быть оказано влияние СВЧ-разрядов на УВ. Были получены длины и температуры СВЧ-стримеров, при которых происходит взаимодействие СВЧ-нитей с УВ: обычно они соответствовали нитям-филаментам шириной 0,1-0,5 мм, длиной более 0,5-1 см, с внутренней температурой газа более 2500 К. Нити должны быть направлены под некоторым углом к УВ. В ходе проведения исследования не было получено какого-либо существенного эффекта, когда поперечное сечение нити перпендикулярно направлению движения УВ.

Согласно экспериментальным данным электрические поля в стримерах (наши горячие нити) могут находиться в диапазоне 25–75 кВ/см при атмосферном давлении, авторы работы сделали расчеты при 25 и 40 кВ/см. При этом рассматривалась плазма, созданная в филаментах электрическими разрядами со значением электрического поля, равным критическому полю пробоя 25 кВ/см и сверхкритическому электрическому полю 40 кВ/см. Электроны иницируются фоновым атмосферным источником электронов 4 и 10 (см³·с)⁻¹, соответствующих атмосферным условиям.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, ударная волна, стример, нити СВЧ-разряда, филамент

COMPUTER MODELING OF THE EFFECT OF MICROWAVE DISCHARGE STREAMER STRUCTURES ON SHOCK WAVE PROPAGATION**Isakov I.I.,***doctor of technical sciences, professor, head of the laboratory of shock-wave technologies,**e-mail: iesakov@yandex.ru,**Moscow Witte University,*

Bychkov V.L.,

*doctor of physical and mathematical sciences, senior researcher, faculty of physics,
e-mail: bychvl@gmail.com,
Lomonosov Moscow state University,*

Ardelyan N.V.,

*doctor of physical and mathematical sciences, senior researcher,
faculty of computational mathematics and Cybernetics,
e-mail: ardelnik@gmail.com,
Lomonosov Moscow state University*

The presented research is devoted to computer modeling of interaction between shock waves (SW) and streamers of the high-frequency discharge in connection with the problem of sonic boom. Currently, there are a number of works relating to the use of plasma to attenuate the sonic boom. The authors of the article consider the creation of hot filaments (filaments) by different plasma sources. In the approaches associated with the use of microwave discharge, the propagation of SW through hot filaments is assumed, causing their explosion and affecting the SW itself.

This work is devoted to the study of the propagation of SW through the microwave discharge strands in order to determine the parameters of filaments, at which the influence of microwave discharges on SW can be exerted. Lengths and temperatures of microwave streamers were obtained at which the interaction of microwave filaments with SW occurs: they usually corresponded to filaments with a width of 0.1-0.5 mm, a length of more than 0.5-1 cm, with an internal gas temperature of more than 2500 K. The filaments should be directed at some angle to the SW. In the course of the study, no significant effect was obtained when the cross-section of the filament is perpendicular to the direction of motion of the SW.

*According to experimental data, electric fields in streamers (our hot filaments) can be in the range of 25-75 kV / cm at atmospheric pressure, the authors made calculations at 25 and 40 kV / cm. The plasma created in filaments by electric discharges with an electric field value equal to the critical breakdown field of 25 kV/cm and the supercritical electric field of 40 kV/cm was considered. Electrons are initiated by a background atmospheric source of electrons 4 and $10 \text{ (cm}^3\text{*s)}^{-1}$ corresponding to atmospheric conditions.*

Keywords: computer modeling, shock wave, streamer, microwave discharge filaments, filament

DOI 10.21777/2500-2112-2019-3-45-56

Введение

В настоящий момент понятно, что разработка «тихих» сверхзвуковых самолетов окажет значительное влияние на авиацию. Понимание этого факта привело к многолетним исследованиям [20, 19], при незначительном продвижении на пути решения, особенно при решении проблемы подавления звукового удара.

Звуковой удар возникает в результате слияния дальнего поля ударно-волновой структуры в волну дальнего поля, которая имеет характерную «N» -образную структуру волны давления. Работы по смягчению звукового удара начались в 1960-х годах, и многие аспекты формирования звукового удара хорошо изучены. На след звукового удара может очень сильно влиять форма самолета, в частности длина самолета. Добавление тепла в поток уже давно рассматривается как возможный подход. Сложность состоит в том, что любые эффекты, которые реализуются вблизи самолета, имеют тенденцию исчезать в дальней зоне. В дальней зоне ударная волна может превратиться в характерную «N» структуру. Чтобы оказать существенное влияние на структуру дальнего поля [16], в поток необходимо добавить энергию в масштабе длины транспортного средства. Это может быть реализовано с помощью добавления энергии вне тела под самолетом. В этом случае добавление энергии вне тела генерирует виртуальный головной скачок, который имеет эффект увеличения видимой длины самолета. Этот начальный скачок может быть использован для смягчения резкой характеристики переднего фронта волны «N» и может

также влиять на соединении скачков в дальнем поле. При динамическом добавлении энергии могут быть реализованы трехмерные эффекты, и появляется возможность полного разрушения звуковой волны в дальнем поле.

На основе этой концепции были проведены теоретические исследования в [15, 17] по изучению взаимодействия лазерного пробоя с модельной ударной волной в потоке с числом Маха = 2,4. Используемый численный код предсказал ослабление модельного удара, когда тепловое пятно взаимодействовало с ним. Была начата экспериментальная программа для проверки результатов расчетов в небольшой аэродинамической трубе. Измерения ближнего поля в аэродинамической трубе выявили предсказанные взаимодействия в серии изображений, которые были получены с использованием методов Шлирена и теневой фотографии графа (для этой цели использовалась камера с высокой частотой смены кадров). Одним из выводов [15, 17] было то, что для лучшего воздействия лазерного излучения необходимо сформировать область вложения энергии в виде листа.

С точки зрения вложения энергии в некоторые большие области лазеры не очень эффективны (они используют только несколько процентов поставляемой энергии), но они могут быть эффективны при создании горячих точек и следов, поэтому более эффективный метод должен применяться для создания длинной и большой площади вложения энергии, и этот метод может включать лазеры в качестве инициаторов.

Результаты исследования распространения газодинамических возмущений в областях, возбуждаемых СВЧ разрядом, показывают возможность применения СВЧ разряда для воздействия на звуковой удар, возникающий при полете сверхзвукового самолета. Чтобы реализовать это, нужно осуществить СВЧ разряд в передней части ударной волны с помощью некоторой установки, установленной на самолете. При распространении через зону разряда интенсивность каждой ударной волны, сопровождающей полет сверхзвукового самолета, будет существенно уменьшена. Его фронты будут сглажены, а энергия рассеется. В результате звуковой удар вблизи земной поверхности может быть ослаблен.

С точки зрения применения электромагнитных волн СВЧ представляет наибольший интерес для смягчения звукового удара. СВЧ разряд может быть реализован на достаточном расстоянии от транспортно-средства, в то время как его положение, структура и параметры плазмы могут быть быстро изменены. СВЧ разряды имеют следующие свойства: такой разряд создает сложную сеть из горячих нитей с низкой плотностью при давлении воздуха в диапазоне 0,1-1 атм. Свойства СВЧ-разряда в фокусе пучка СВЧ-излучения существенно зависят от длины волны λ , амплитуды напряженности электрического поля E , длительности импульса τ , пространственной структуры поля и т.д. [13, 9, 10]. Разряд обычно имеет форму сложной сетки стримерных нитей, если давление газа превышает 10 Торр. Например, на рисунке 1 можно увидеть фотографию СВЧ стримерного разряда.

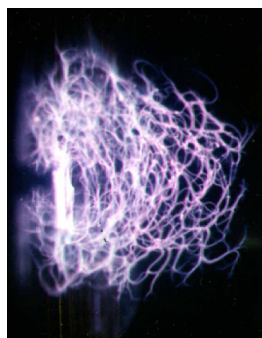


Рисунок 1 – Типичный вид инициированного стримерного СВЧ-разряда в неподвижном воздухе при атмосферном давлении. Излучение направлено слева направо. Размер разряда около 10 см.

Стримерный СВЧ-разряд состоит из сложной сети плазменных каналов, растущих по направлению к лучу излучения и поперек него. Характерный диаметр канала составляет доли миллиметра,

расстояние между ними составляет порядка $1/4$ длины волны λ . Температура газа внутри каналов составляет несколько тысяч градусов Кельвина. Стримерный СВЧ-разряд поглощает практически всю энергию проходящей электромагнитной волны.

Это поглощение происходит на сеточном фронте с шириной, равной доле длины волны. Энергия поглощается формирующимися резонансными участками плазменных каналов. Интенсивное рассеяние энергии в локальных областях сопровождается генерацией сложной структуры ударных волн и каналов с низкой плотностью. СВЧ-разряд может создаваться СВЧ-излучением с величиной напряжённости электрического поля, значительно меньшей критического значения поля пробоя.

Основная сложность реализации СВЧ разряда при высоком давлении состоит в требовании к уровню величины поля электромагнитной волны, необходимой для пробоя газа. Например, в описанных экспериментах [8] мощность СВЧ излучения, подаваемого в зону разряда, составляла около 1 МВт при ширине пучка 10 см.

В этом отношении стримерный СВЧ-разряд имеет важное свойство. Он может быть реализован в поле E_0 намного меньше критического E_c при использовании инициатора. Например, в [8] было достигнуто соотношение $E_c/E_0 = 60$. В этом случае интенсивность излучения, необходимая для реализации разряда, в 3600 раз меньше, чем при E_c . Это свойство стримерного разряда очень важно, особенно для применений при создании разряда в большом объеме. При этом лазерная искра может служить лишь инициатором [1, 3].

СВЧ-разряд может создаваться в сверхзвуковом потоке. Скорость потока может превышать несколько км/с. Характерная скорость роста стримерных каналов составляет около 10^6 см/с, а скорость распространения разрядной области - 10^5 – 10^6 см/с. Это означает, что разряд может поддерживаться в сверхзвуковом потоке [4]. Эксперименты подтвердили эту способность (рисунок 2).

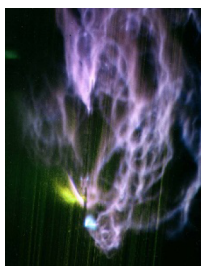


Рисунок 2 – Инициированный стримерный СВЧ-разряд в сверхзвуковом потоке. Поток направлен вверх, излучение слева на право

УВ, распространяющаяся через область, заполненную сеткой из горячих нитей, создаваемых СВЧ-разрядом, сильно рассеивается. Эксперименты по распространению ударной волны взрывного типа в области, возбуждаемой СВЧ-разрядом, описаны в [11, 5, 12, 18].

Пример экспериментальной зависимости профиля скачка (от времени его задержки) проходящего в зону распада разряда при давлении 30 Торр, приведен на рисунке 3. Можно видеть, что чем меньше время задержки (время между импульсом СВЧ и генерацией УВ), тем больше влияние: чем меньше амплитуда УВ, тем более гладкой является ее форма. При давлении более 30 Торр подавление ударной волны было настолько сильным, что приемник ничего не смог обнаружить. Физическая природа этого явления, наиболее вероятно, связана с турбулентными процессами в области разряда [5].

В [7] предполагалось, что основная причина сильной диссипации ударной волны связана с возбуждением сверхзвуковых вихрей, когда скачок взаимодействует с горячими нитями. Эти вихри появляются при взрывах горячих нитей при распространении УВ внутри них. Эти взрывы взаимодействуют друг с другом, поэтому генерируемые возмущения не являются обычной турбулентностью и имеют долгое время существования.

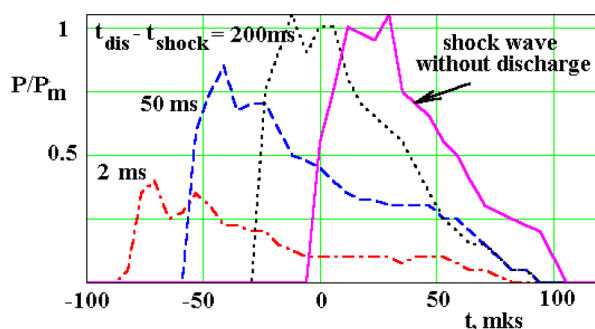


Рисунок 3 – Взаимодействие ударной волны с областью, возбуждаемой СВЧ-разрядом (давление газа – 30 Торр)

Обсуждаемые выше экспериментальные данные дают основание для разработки приложений СВЧ-разрядов для решения проблемы звукового удара. Перечисленные выше свойства позволяют сформулировать метод смягчения звукового удара. Пример реализации.

Представленная выше информация показывает, что необходимы фундаментальные теоретические и компьютерные исследования, посвященные анализу распространения ударной волны через горячие нити стримерного СВЧ, приводящие к созданию газодинамически возмущенной области. Этот анализ должен быть начальным этапом исследований, он должен включать:

- а) моделирование или анализ нагрева горячей нити в неподвижном воздухе;
- б) моделирование распространения УВ ($M = 2$) через горячую нить, перпендикулярную распространению УВ;
- в) моделирование распространения УВ ($M = 2$) через горячую нить параллельно распространению УВ;
- г) рассмотрение различных форм нитей и температур нагрева.

Только в случае определения влияния УВ на горячие нити можно было бы исследовать более реалистичную ситуацию с СВЧ-нитью с различными состояниями молекул в ней, возбуждаемой внешним электрическим полем и распространяющейся по нити УВ.

Начальная стадия

Согласно экспериментальным данным электрические поля в стримерах (наши горячие нити) могут находиться в диапазоне 25–75 кВ/см при атмосферном давлении. Нами были проделаны расчеты при напряженности электрических полей 25 и 40 кВ/см. При этом рассматривалась плазма, созданная в стримерах – филаментах электрическими разрядами со значением электрического поля, равным критическому полю пробоя 25 кВ/см и сверхкритическому электрическому полю 40 кВ/см. При этом электроны появляются при действии фонового атмосферного источника электронов с интенсивностью 4 и 10 $(\text{см}^3 \cdot \text{с})^{-1}$, соответствующем атмосферным условиям.

В начальной стадии, когда газодинамические возмущения еще не движутся по стримеру, мы рассматриваем изменение параметров плазмы при действии СВЧ разряда. Целью анализа является выяснение начальных условий внутри нити в условиях нормальной атмосферы. Эти условия могут быть использованы для формулировки начального состояния при распространении УВ по филаментам.

Рассмотрены компоненты сухого воздуха: электроны – быстрые e^+ и медленные e^- ; нейтральные компоненты N_2 , N , NO , O_2 , O , O_3 ; возбужденные состояния $N_2(v)$, $N_2(A)$, $N_2(B)$, $O_2(v)$, $O_2(D)$, $O_2(b)$; положительные ионы N_2^+ , N^+ , NO^+ , O_2^+ , O^+ ; отрицательные ионы: O_2^- , O^- , O_3^- .. Мы используем химические реакции и методы расчета состава плазмы, представленные в [14].

На рисунке 4.1 а), б) можно увидеть динамику концентраций заряженных частиц во время действия электрического поля длительностью 100 мкс с временем релаксации 60 мкс при атмосферном давлении. Напряженность электрического поля составляет 25 кВ/см и 40 кВ/см. Концентрация электронов и ионов возрастает до значений 10^{14} – 10^{15} см^{-3} и более. Релаксация состояния плазмы очень

быстрая, она лежит в диапазоне 3–5 мкс, поэтому форма эволюции плазмы во времени имеет резкий вид при коротких временах действия поля. При электрическом поле в 25 кВ/см процессы ионной перезарядки идут медленно, и видно, что сначала происходит образование иона NO^+ , а позже происходит его преобразование в ион N_2^+ , что связано с разрушением ионов NO^+ с ростом температуры. При внешнем поле в 40 кВ/см процессы ионной перезарядки идут в 20 раз быстрее, и видно, что происходит образование иона N_2^+ за 2 мкс с ростом температуры и плазма становится простой по ионному составу.

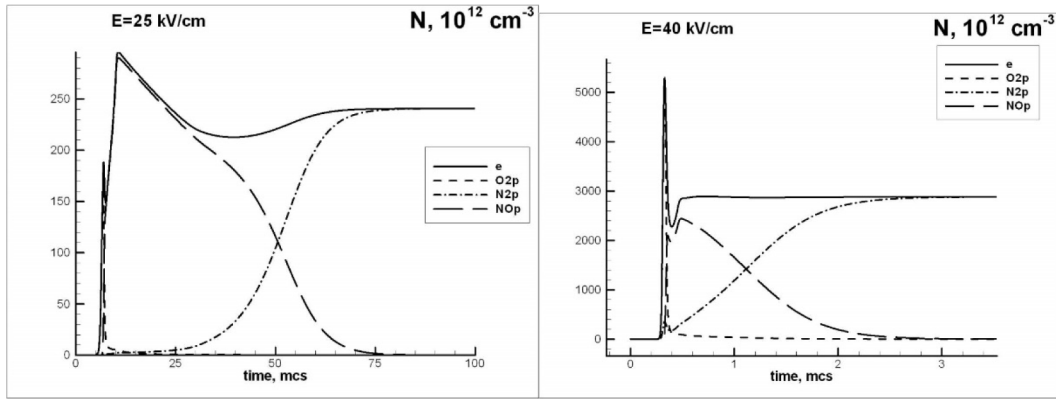


Рисунок 4.1 – Концентрации заряженных частиц во время действия поля в течение 100 мкс: а) напряженность электрического поля составляет 25 кВ/см; б) напряженность поля составляет 40 кВ/см (e – электроны, $\text{O}_2\text{p} \equiv \text{O}_2^+$, $\text{N}_2\text{p} \equiv \text{N}_2^+$, $\text{NOp} \equiv \text{NO}^+$)

На рисунке 4.2 а), б) показано, что процессы изменения сорта молекул происходят внутри филаментов с образованием атомов N и O. Это приводит к образованию NO внутри филаментов. Этот результат коррелирует с результатами работы И. Косого из ИОФАН, который наблюдал образование NO в стримерах в воздухе [2].

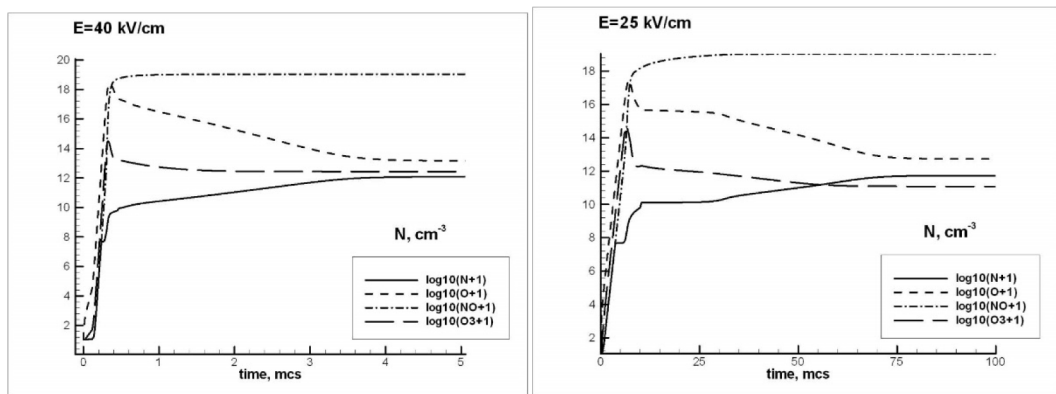


Рисунок 4.2 – Концентрации нейтральных частиц во время действия поля в течение 100 мкс: а) напряженность электрического поля составляет 25 кВ/см; б) напряженность электрического поля составляет 40 кВ/см

На рисунке 4.3 а), б) показывают, что в плазме филамента находится большое количество колебательно возбужденных молекул N_2 и O_2 и электронно-возбужденных молекул $\text{O}_2(\Lambda)$. Они образуются в течение времени менее 5 мкс и остаются такими (мс) из-за медленных процессов колебательной и электронной релаксации. Таким образом, нить остается в состоянии сильного возбуждения при ее возбуждении электрическим полем.

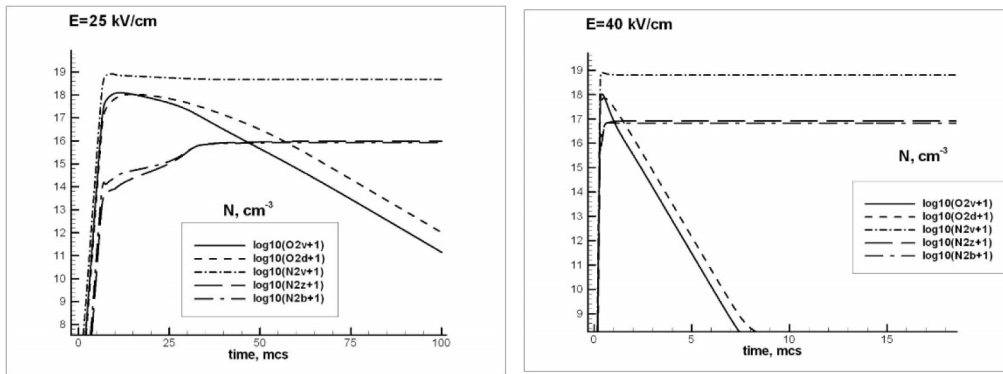


Рисунок 4.3 – Концентрации нейтральных электронно-возбужденных частиц во время действия поля в течение 100 мкс: а) напряженность электрического поля составляет 25 кВ/см; б) напряженность электрического поля составляет 40 кВ/см

На рисунке 4.4 а), б) показывают быстрый рост температуры электронов и газа. Температура электронов быстро снижается после выключения электрического поля. Температура газа оказывается достаточно высокой, она изменяется в диапазоне от 2500 до 3500 К. Это согласуется с работой, в которой описано воспламенение пропана с помощью СВЧ разряда [6]. Работы по воспламенению пропана показали, что развитое воспламенение пропана происходит при температуре смеси $T = 2500\text{-}2700 \text{ К}$. Температура газа долго остается той же (мс) после снижения концентрации электронов. Таким образом, горячая нить возникает гораздо раньше, чем реализуются газодинамические возмущения. Именно эта высокая температура внутри филаментов позволяет нам использовать ее при моделировании распространения УВ по горячим филаментам. Однако, понятно, что релаксационные процессы приведут к взрыву нитей. Анализ этой ситуации может быть сделан позже.

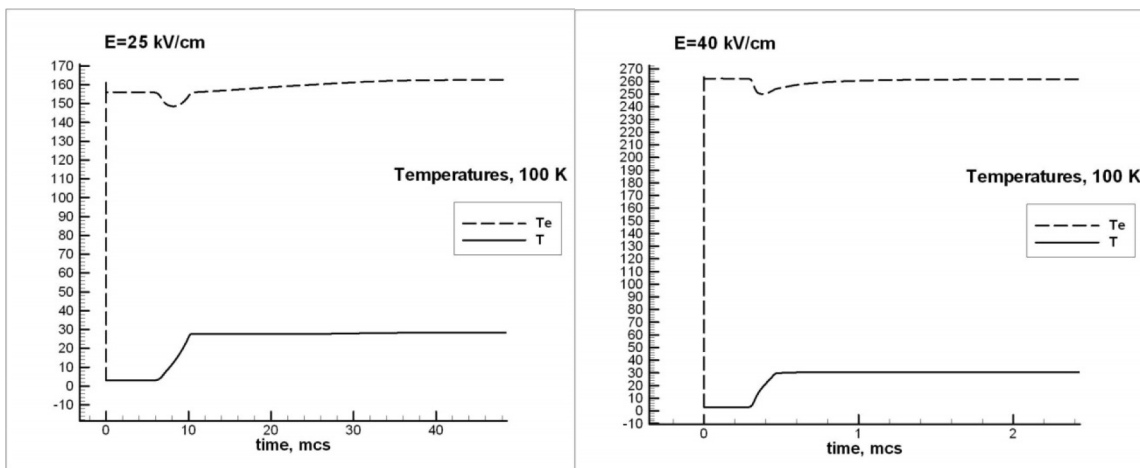


Рисунок 4.4 – Температуры электронов и газа во время действия поля в течение 100 мкс: а) напряженность электрического поля составляет 25 кВ/см; б) напряженность электрического поля составляет 40 кВ/см

Таким образом, для расчетов распространения УВ по газу со стримерами мы можем рассмотреть их температуру в широком диапазоне $\sim 1000\text{-}4000 \text{ К}$, поскольку нити могут быть сформированы стримерами в сильных электрических полях и при взаимодействии с газовой областью, где предыдущий стример распался.

Итак, расчеты показывают высокий рост температуры газа внутри филаментов до $T = 2500\text{-}3000 \text{ К}$, это объясняет ряд экспериментов с воспламенением пропана.

Нагретый газ существует во филаментах намного дольше, чем плазма (до тех пор, пока развитие газодинамических процессов не изменит ситуацию), поэтому можно ожидать взаимодействия УВ с нагретыми филаментами.

Мы используем этот факт для анализа взаимодействия УВ с нагретыми нитями, как с термической неоднородностью в интервале $T = 700\text{--}3500\text{ K}$.

Моделирование взаимодействия ударной волны с нитью СВЧ-разряда

Умеренная температура внутри нити

В этом разделе исследуется распространение ударной волны (УВ) в стационарных областях термической неоднородности (давление постоянное), которые рассматриваются как области, созданные СВЧ-разрядами. Применён двумерный подход [14], так как предварительные расчёты в одномерном подходе не обнаружили никакого влияния горячих областей на УВ, несмотря на изменение температуры области тепловой неоднородности и скорости УВ.

Было предпринято численное моделирование для различных форм областей термической неоднородности. Целью исследований являлось выявление изменения ударной волны (затухание, изменение геометрии) при ее распространении в областях термической неоднородности с параметрами, соответствующими СВЧ-разрядам.

Рассмотрим три плоские двумерные модели, в которых термическая неоднородность представляет собой: ленту, расположенную под углом к фронту УВ; криволинейную синусоидальную полосу; круг.

Численное моделирование проводилось с помощью двумерного метода Лагранжа с адаптивной перестройкой сетки. Сетка была более плотной в горячей области и на фронте УВ. Сама УВ инициируется потоком, параметры которого соответствуют параметрам УВ в задаче о воздействии поршня на газ.

Параметры газа перед УВ: температура газа составляет 290 K, давление – 1 атм, скорость поршня Mv_s , где $M = 0.5$ – число Маха, v_s – скорость звука в газе перед фронтом УВ. Температура газа в полосовом или круговом моделирующем СВ-разряде постепенно снижается с 700 K до температуры окружающего газа 290 K, давление в области равно давлению окружающего газа. Ширина полосы равна ширине круга и составляет 1 мм. Эта принята равной типичной ширине стримера.

Изменение формы полосы на рисунках 5.1 и 5.2 может быть следствием изменения температуры в полосе при распространении по ней УВ. На рисунках 5.3–5.4 можно наблюдать изменение давления в полосе при распространении по ней УВ. На рисунке 5.5 видно распределение лучевой скорости на последний расчетный момент.

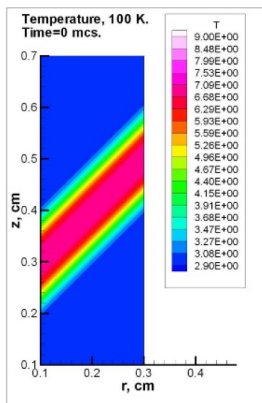


Рисунок 5.1

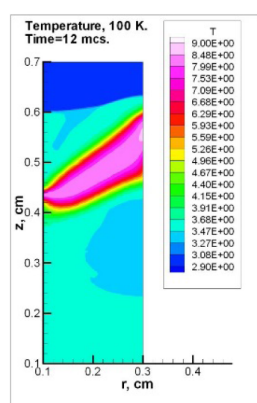


Рисунок 5.2

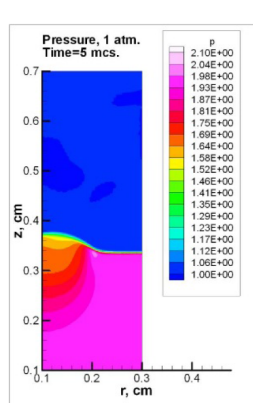


Рисунок 5.3

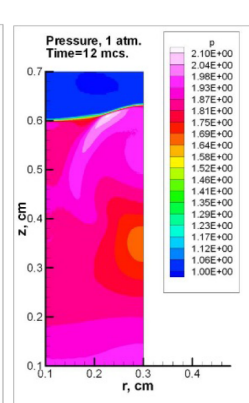


Рисунок 5.4

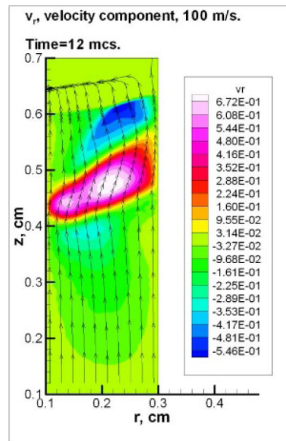


Рисунок 5.5

Изменение формы полосы на рисунках 5.6–5.8 может быть следствием изменения температуры в косинусной полосе при распространении по ней УВ. На рисунках 5.9–5.10. видно изменение давления в косинусной полосе при распространении по ней УВ. На рисунке 5.11 видно распределение лучевой скорости на последний момент расчета.

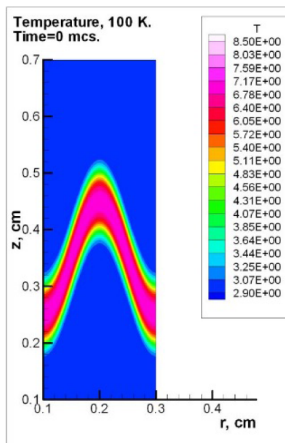


Рисунок 5.6

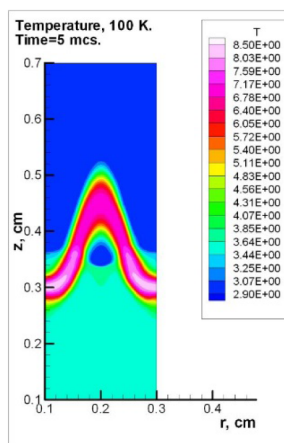


Рисунок 5.7

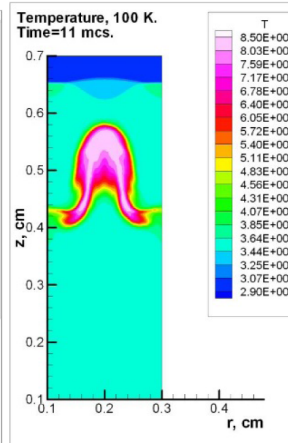


Рисунок 5.8

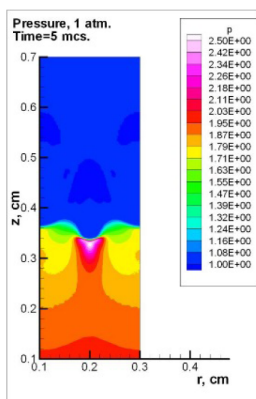


Рисунок 5.9

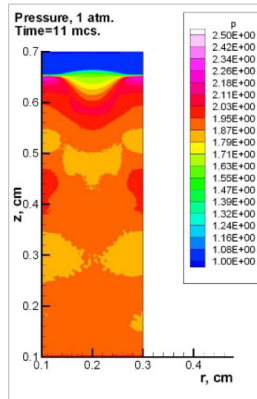


Рисунок 5.10

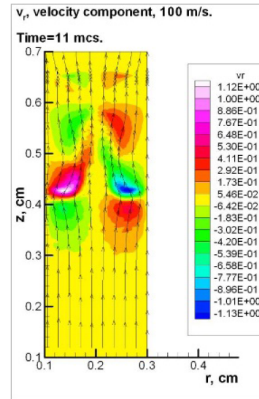


Рисунок 5.11

Изменение формы области на рисунках 5.12–5.14 может быть следствием изменения температуры в полосе при распространении по ней УВ. На рисунках 5.15–5.16 можно видеть изменение давления в полосе при распространении по ней УВ. На рисунке 5.17 видно распределение лучевой скорости на последний расчетный момент.

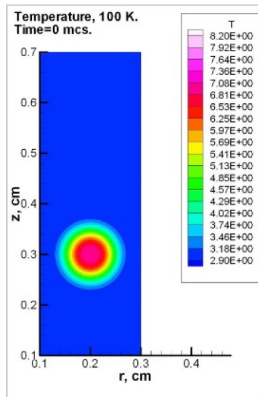


Рисунок 5.12

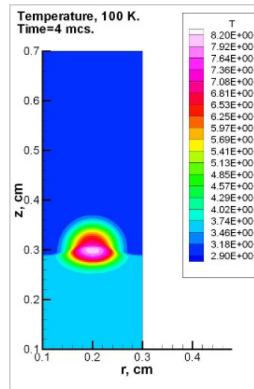


Рисунок 5.13

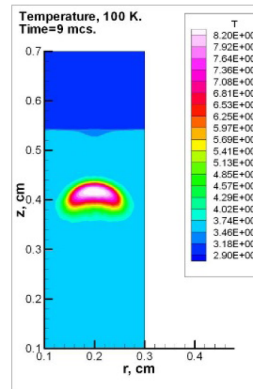


Рисунок 5.14

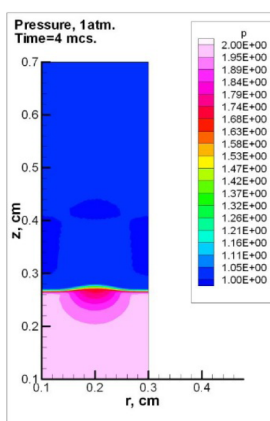


Рисунок 5.15

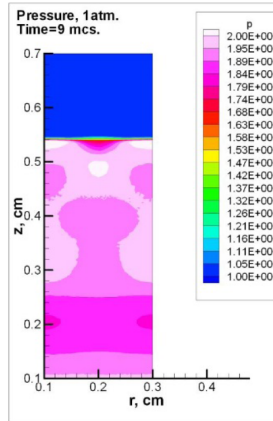


Рисунок 5.16

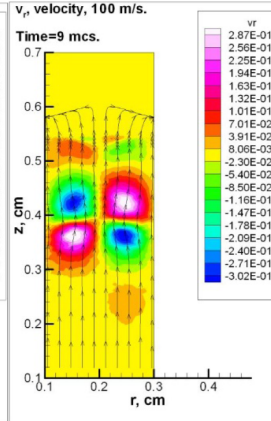


Рисунок 5.17

Сравнение результатов показывает, что в случае расположения полосы под углом к УВ и при взаимодействии полосы косинусного типа с УВ приводит к существенному изменению давления на длинах $\sim \lambda/2$ (λ – длина волны излучения). Это означает, что несколько таких тепловых неоднородностей могут модифицировать фронт УВ. Чем длиннее длина волны и чем больше площадь плазменного облака, тем больше эффект.

Эффект практически отсутствует, когда распространение УВ перпендикулярно горячей нити.

Эти результаты показывают, что затухание УВ на филаментах СВЧ-разряда является 2-мерным и трехмерным эффектами и имеет влияние даже при игнорировании релаксационных процессов при взаимодействии УВ с горячими филаментами.

Влияние нитей на давление должно быть больше при более высоких температурах нитей, здесь мы использовали их среднюю температуру $T=700$ К.

Выводы

Продланное компьютерное моделирование показало, что существует влияние на фронт УВ при взаимодействии горячей СВЧ-нити и УВ:

- горячих нитей синусоидальной формы;
- горячих нитей, расположенных под некоторым углом к УВ;
- горячих нитей длиной 0,5 см и более.

При этом практически отсутствует влияние цилиндрических нитей расположенных перпендикулярно направлению движения УВ.

Влияние горячих нитей на фронт УВ при взаимодействии нити с УВ является двумерным или трехмерным эффектом.

Реконструкция давления и скорости потока с образованием вихрей и других сложных структур происходит при взаимодействии УВ и СВЧ-филамента.

Эффект увеличивается с повышением температуры нити.

Оценочные расчеты показывают, что начальная температура стримера лежит в диапазоне 2000–3000 К, что объясняет возможность воспламенения углеводородного газа от СВЧ-стримерных разрядов.

Длинные стримеры и ряды стримеров должны сильно влиять на фронт УВ и могут применяться в задачах по ослаблению звукового удара.

Список литературы/References

1. *D. Van Wie, D.J. Risha, C.F. Suchomel*, Research issues resulting from an assessment of technologies for future hypersonic aerospace systems. AIAA-2004-1357. 42-nd AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. 5-8 January 2002. Reno. NV.
2. *G.M. Batanov, S.I. Gritsinin, I.A. Kossyi et al.* MW discharges of high pressure. Works of FIAN SSSR, 1985. P.160.
3. *I.Ch. Mashek, Yu.I. Anisimov, V.A. Lashkov, Yu.F. Kolesnichenko*, Multibeam Interferometry of Self-sustained and Laser Induced MW Discharges in Air. AIAA 2005-0790. 43-rd AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. 10-13 January 2005. Reno. № V.
4. *I.I. Esakov, L.P. Grachev, K.V. Khodataev*. The review of plasma gasdynamic experiments in Russia, conclusions and prospects of plasma technology applications in aerodynamics. Proc. Supplement of 3-rd Weakly Ionized Gases Workshop. Waterside Marriott Hotel, Norfolk, Virginia, USA, 1-5 November, 1999, 99-4821.
5. *I.I. Esakov* The interaction of the shock wave with the decaying plasma of the electrodeless microwave discharge in air // News of the Siberian Department of the SU Academy of Sciences, Technical Sciences Series, is.1, p. 98–102 (1990).
6. *I.I. Esakov, L.P. Grachev, K.V. Khodataev, D.M. Van Wie* Investigation of the possibility of the application of the undercritical microwave streamer gas discharge for the ignition of a fuel in the jet engine // 32nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference and 4th Weakly Ionized Gases Workshop (11-14 June/Anaheim, CA). -AIAA-2001-2939.
7. *K.V. Khodataev*. Physics of the Undercritical Microwave Discharge and Its Influence on the Supersonic Aerodynamics and Shock Waves // Proc. of Workshop on Weakly Ionized Gases. USAF Academy, Colorado 9-13 June 1997, v. 1, pp. L-1–L-12.
8. *L.P. Grachev, I.I. Esakov, K.V. Khodataev* The high-frequency air breakdown in presence of the vibrator // Журнал Технической Физики, vol. 65, is. 7, p. 60–67 (1995).
9. *L.P. Grachev, I.I. Esakov, et al.* The dynamics of development of the electrodeless discharge space structure // Журнал Технической Физики, vol. 59, is. 10, p. 149–154 (1989).
10. *L.P. Grachev, I.I. Esakov, K.V. Khodataev* Stages of the electrodeless microwave discharge development // Журнал Технической Физики, vol. 66, is. 7, p. 32–45 (1996).
11. *L.P. Grachev, I.I. Esakov, K.V. Khodataev* The interaction of the shock wave with the decaying plasma of the electrodeless microwave discharge // Журнал Технической Физики, vol. 55, is. 5, p. 972–975 (1985).
12. *L.P. Grachev, I.I. Esakov* The acoustical properties of air excited by electric discharge // Журнал Технической Физики, vol. 60, is. 11, p. 183–185 (1990).
13. *L.P. Grachev, I.I. Esakov, K.V. Khodataev* The electrodeless discharge in air under moderate pressure Журнал Технической Физики, vol. 55, is. 2, p. 389–391 (1985).
14. *N.V. Ardelyan, V.L. Bychkov, D.V. Bychkov, K.V. Kosmachevskii* CHAPTER 3. ELECTRON-BEAM AND NON-SELF-MAINTAINED DRIVEN PLASMAS FOR PAC. In Plasma assisted combustion, gasification and pollution control. Vol. 1. Ed. I.B. Matveev. Outskirts press. Denver, Colorado. 2013. P. 183–372.
15. *R.B. Miles, L. Martinelli, S.O. Macheret, M. Shneider, et al.* Suppression of sonic boom by dynamic off-body energy addition and shape optimization. AIAA 200-0150. 40-th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. 14-17 January 2002. Reno. NV.

16. *R.B. Miles, S.O. Macheret, L. Martinelli, R. Murray, et al.* Plasma control of shock waves in aerodynamics and sonic boom mitigation. AIAA 2001-3062. 32-nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference and 4-th Weak-ly Ionized Gases Workshop Conference & Exhibit. 11-14 June 2001. Ana-heim. CA.
17. *S.H. Zaidi, M.N. Shneider, D.K. Mansfield, Y.Z. Ionikh, R.B. Miles* Influence of upstream pulsed energy deposition on a shockwave structure in supersonic flow. AIAA-2002-2703. 22-nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. 24-26 June 2002. St.Louis. Missouri.
18. *S.R. Norris, E.A. Haering Jr., J.E. Murray* Ground – based sensors for the SR-71 Sonic Boom propagation experiment. 1995 High Speed Research Program Sonic Boom Workshop, NASA Langley Research Center, Hamp-ton, VA, Sept. 12-13. 1995.
19. *V.I. Ganabov, E.V. Vlasov, B.M. Efimtsov, Yu.L. Zhilin, et al.* Aviation acoustics. Moscow. Mashinostroenie. 1973.
20. *W.D. Hayes*, Sonic Boom. Ann. Rev. Fluid. – Mech, 1971. – № 3. – P. 269–290.